Résolution de problèmes complexes

Mise à jour : 07/10/2011

Après avoir montré que les résultats des phénomènes déterministes sont parfois trop complexes pour être calculables, nous décrirons une approche des problèmes complexes et de la conduite des projets complexes basée sur la méthode des « quatre préceptes » de Descartes.

Evolution d'une situation régie par une ou plusieurs loi(s) déterministes

L'effet global d'un grand nombre de phénomènes déterministes peut être imprévisible, même si chacun est simple et à résultat prévisible.

Exemple : considérons une petite enceinte fermée qui contient un nombre immense de molécules identiques de liquide ou de gaz. Le seul fait que ces molécules aient une température supérieure au zéro absolu fait qu'elles s'agitent sans cesse, l'énergie cinétique associée à leur vitesse provenant de la température. Cette agitation, appelée *mouvement brownien*, les fait rebondir les unes sur les autres et sur les parois, conformément à des lois des chocs élastiques parfaitement connues et déterministes, sans intervention du hasard. Mais il est impossible de connaître la position et la vitesse à l'instant *t* d'une molécule donnée, car :

- Elle a subi trop de rebonds contre d'autres molécules en mouvement et contre les parois de l'enceinte pour que les calculs soient à la portée d'un ordinateur, même très puissant ;
- A l'échelle atomique, chaque rebond de molécule est affecté par sa forme irrégulière, la rugosité locale de la paroi, et l'imprécision sur la position, la direction et la vitesse d'un choc due à la largeur du paquet d'ondes accompagnant chaque molécule. La loi des chocs élastiques est donc difficile à appliquer avec précision, les conditions initiales de chaque choc étant entachées d'erreurs non négligeables et aucune approche statistique n'étant possible.

Cette impossibilité de connaître le mouvement précis d'une molécule donnée est très générale : la combinaison d'un grand nombre de phénomènes déterministes à évolution individuelle prévisible produit une évolution imprévisible, que ces phénomènes soient ou non du même type. Par *combinaison* il faut entendre ici :

- soit *une succession de phénomènes de même type* comme les chocs élastiques d'une molécule donnée ;
- soit *la simultanéité de phénomènes déterministes différents* qui agissent indépendamment ou interagissent pour produire un effet global ;
- soit *l'instabilité d'un phénomène* qui change de loi d'évolution selon un paramètre critique soumis à *un autre* phénomène d'évolution lors d'une bifurcation.

En résumé, *la complexité d'un phénomène à composantes déterministes produit en général une évolution imprévisible*, et encore plus imprévisible si on prend en compte les imprécisions dues à la mécanique quantique.

Il faut pourtant se garder d'attribuer au hasard une évolution qui n'est imprévisible que parce que la complexité du phénomène d'origine rend impossible la prédiction de son résultat par calcul ou raisonnement. Nous verrons que le hasard caractérise un choix d'élément de l'ensemble (déterministe) des résultats-valeurs propres possibles d'une évolution, alors que l'imprévisibilité caractérise une inexistence d'algorithme à résultats utilisables.

L'imprévisibilité par excès de complexité, qui n'existe pas en théorie parce que les lois d'évolution sont déterministes, sévit hélas en pratique. Elle n'affecte pas la nature, qui jamais n'hésite ou ne prévoit l'avenir, mais elle empêche l'homme de prédire ce qu'elle va faire. Et l'imprévisibilité est d'autant plus grande que le nombre de phénomènes successifs ou simultanés est grand, que leur diversité est grande, que leurs interactions sont nombreuses et que l'imprécision quantique intervient.

Les interactions entre phénomènes ont un effet sur leur déterminisme lui-même. Une évolution dont le résultat impacte les conditions initiales d'une autre évolution joue sur la reproductibilité de cette évolution, ce qui handicape encore plus la prédiction de son résultat.

C'est pourquoi les phénomènes les plus complexes (ceux des êtres vivants, du psychisme de l'homme) ont beau ne comporter au niveau biologie moléculaire que des évolutions physiques déterministes, leurs résultats sont en général si imprévisibles que l'homme a l'impression que la nature fait n'importe quoi.

Approche analytique ou approche holistique ?

La discussion précédente montre qu'il est souvent impossible de prévoir l'évolution d'une situation complexe, même si tous les paramètres de cette évolution sont déterministes, à partir d'une connaissance de toutes ses lois d'évolution et d'interaction : cette approche analytique est en général vouée à l'échec.

On peut alors abandonner cette approche analytique au profit d'une approche plus globale, holistique. Au lieu de tenter la synthèse d'un nombre immense de phénomènes déterministes, on regroupera ceux-ci en « macro-phénomènes » dont on étudiera le comportement.

Exemple 1 : au lieu de s'intéresser au comportement de chacune des milliards de molécules de gaz d'un récipient (sans intérêt !), on s'intéresse à la température et à la pression qui règnent dans ce récipient, variables macroscopiques rendant compte des propriétés d'ensemble des molécules du récipient.

Exemple 2 : l'écoulement turbulent d'un fluide est trop complexe à étudier et décrire en fonction des 4 paramètres mesurables que sont sa densité, sa vitesse, sa viscosité cinématique et la longueur d'un obstacle. On utilise une variable sans dimension unique qui en dépend, le nombre de Reynolds [293].

Exemple 3 : pour prévoir le chiffre d'affaires des ventes de vêtements d'hiver en France pour une semaine donnée en fonction de la température ressentie, on remplace l'interrogation de chaque personne (utopique !) par la considération d'un « Français moyen » dont on connaît le nombre, et les températures des divers jours ouvrables par la moyenne hebdomadaire de leurs valeurs minimales.

Les exemples 1 et 3 illustrent une première approche des problèmes complexes, l'utilisation de modèles statistiques ; l'exemple 2 illustre une autre simplification, le regroupement de paramètres.

Nous allons à présent évoquer brièvement la résolution de problèmes complexes ne se résumant pas, comme les précédents, à prévoir par calcul un ensemble de résultats d'évolution. Nous sortirons provisoirement du sujet des évolutions déterministes pour raisonner le plus logiquement possible sur deux problèmes plus généraux : la prise de décision en vue d'un objectif dans une situation à la fois complexe et incertaine ; la conduite de projets complexes.

Limite des modèles statistiques

L'économiste Prix Nobel Von Hayek distinguait deux types de domaines complexes.

- Dans les domaines « *à complexité non organisée* », les difficultés de compréhension et de modélisation du comportement dues à la complexité peuvent être contournées grâce à des variables statistiques.

  C'est le cas, par exemple, en mécanique statistique, où le comportement d'un volume de gaz comportant un nombre immense de molécules animées de mouvements browniens peut être modélisé statistiquement à l'aide de moyennes de variables comme la température absolue, la pression et l'énergie d'une molécule. Les lois d'évolution de ces variables statistiques sont déterministes. Exemple : la loi des gaz parfaits $pv=nRT$.

- Dans les domaines « *à complexité organisée* », les divers éléments d'un système ont, en plus de propriétés individuelles et de fréquences d'apparition, des interactions complexes et de types différents qu'on ne peut déterminer quantitativement ou modéliser statistiquement.

  C'est le cas, par exemple, des marchés d'une économie, où interviennent de nombreux acteurs interdépendants et où les hypothèses économiques traditionnelles de rationalité des acteurs et de concurrence pure et parfaite sont loin d'être satisfaites. Dans ce cas, on ne pourra jamais connaître exhaustivement toutes les variables décrivant les divers agents économiques et leurs interactions, et on ne pourra donc pas – même avec un ordinateur puissant – modéliser le marché et prévoir son évolution avec précision [301].

  C'est pourquoi (Hayek a reçu un Prix Nobel pour l'avoir démontré) l'économie communiste de l'ex-URSS n'a jamais pu avoir une planification centralisée de la production et de la consommation qui fonctionne. L'organisme administratif de planification n'a jamais pu connaître les détails précis de ce qu'il était vraiment possible de produire et de transporter, ce qui était effectivement produit, où et à quelle date, etc. Ce qu'il a pu savoir était toujours fragmentaire et très en retard sur la réalité. Il ne pouvait tenir compte d'aléas climatiques locaux impactant l'agriculture ou les transports. Bref, il n'a jamais pu disposer d'informations suffisantes pour piloter la production, le transport et la consommation, d'où des pénuries et des gaspillages énormes.

  En fait, la totalité des informations nécessaires pour déterminer l'évolution d'un marché à partir d'une situation donnée n'est disponible que pour l'entité abstraite qu'est le marché lui-même, pas pour un être humain ou une organisation

humaine. Et comme le comportement humain est souvent imprévisible parce que soumis à des émotions irrationnelles et des anticipations, *l'évolution d'un marché à partir d'une situation donnée est non déterministe*. Hayek a montré qu'on ne pouvait alors établir que des lois *qualitatives* décrivant des relations entre variables économiques et permettant de prévoir des *tendances* d'évolution ; en aucun cas on ne pouvait prévoir le comportement d'un agent économique donné ou la survenance d'un événement particulier comme la date d'éclatement d'une bulle spéculative ou un effondrement boursier [301].

La rigueur des raisonnements

Il y a un autre obstacle à la prise de décisions et la conduite de projets dans le cas des problèmes complexes : l'aptitude des hommes à raisonner correctement.

Exemple

Quelle politique adopter pour répondre à la première préoccupation des Français en cette fin d'année 2011, la peur d'une forte baisse de leur niveau de vie ? Les Français ont peur de perdre leur emploi, de gagner moins et de payer plus d'impôts ; que doivent faire les politiciens au pouvoir ?

Certains politiciens proposent une solution simple : le déficit budgétaire, solution dite keynésienne. D'après eux, l'Etat n'a qu'à dépenser beaucoup plus, par exemple en augmentant les salaires des fonctionnaires et les investissements en infrastructure et recherche. Avec plus d'argent en circulation, les dépenses des consommateurs augmenteront, ce qui générera du travail, donc protégera du chômage et produira plus d'impôts, permettant ainsi de payer les dépenses supplémentaires.

C'est ce qu'a fait le gouvernement d'union de la gauche du Premier ministre Pierre Mauroy en 1981-82, avec un résultat catastrophique : en quelques mois les caisses pleines de l'Etat ont été vidées, le déficit du commerce extérieur a explosé, et la France a dû adopter une politique de rigueur sévère avec Jacques Delors. Il y a eu trois dévaluations successives, dont deux en moins d'un an ! La consommation des Français avait tellement augmenté que la production intérieure n'a pas pu suivre, ce qui a fait exploser les importations, d'où un déficit extérieur qu'il a fallu compenser par des dévaluations du franc. Celles-ci, à leur tour, ont fait exploser les prix des importations, donc les prix intérieurs. D'où une baisse du niveau de vie après quelques mois d'euphorie, et une croissance sans précédent du chômage.

Ce triste exemple historique illustre une vérité très générale : *lorsqu'un problème (ici la croissance économique) a beaucoup de variables interdépendantes, toute solution simple agissant sur une seule variable est inefficace*. L'approche simpliste est en général préconisée par des politiciens esclaves de leur idéologie, incompétents ou démagogues, notamment parce qu'elle est facile à expliquer aux électeurs.

Si le gouvernement Mauroy avait tenu compte des lois économiques enseignées depuis des années, il aurait su que dans une économie ouverte à la concurrence internationale comme celle de la France dans l'Europe, seule une relance concertée avec les principaux partenaires européens peut éviter les déséquilibres des échanges, tous les pays se mettant ensemble à importer et exporter davantage. La relance unilatérale de la France a fait exploser ses importations mais pas ses exportations, d'où le déficit et les dévaluations.

Dans le cas du problème "Quelle politique adopter ?" il y a de nombreuses variables (sous-problèmes), en plus des dépenses de l'Etat. Exemples :

- La politique des taux d'intérêt adaptée à un crédit qui favorise la consommation et l'investissement sans générer d'inflation. Le choix d'un taux adapté est fondamental, lorsque l'on sait qu'*à tout instant le total des crédits des banques françaises à notre économie est de l'ordre d'une année de PIB*. Un manque de crédits asphyxie l'activité ; un excès de crédit provoque de fortes hausses de prix, par exemple dans l'immobilier. C'est parce qu'une économie ne peut fonctionner sans un énorme crédit que l'Etat et la Banque centrale européenne ne peuvent se permettre de laisser les banques d'un pays manquer de liquidités [309].
- La politique fiscale permettant de financer les services publics et les prestations sociales demandés par les citoyens sans handicaper la compétitivité internationale de la France. En 2011, voilà 30 ans que l'Etat, les collectivités territoriales et la Sécurité Sociale dépensent plus que ce que les impôts rapportent. Non seulement la France s'endette pour financer son excédent de dépenses, mais ses « frais généraux » trop élevés handicapent tellement la compétitivité de ses entreprises qu'elle perd chaque année des parts de marché à l'exportation, ce qui détruit des emplois.
- La législation du travail, qui doit favoriser les embauches et ne pas entraîner de coûts de main d'œuvre exorbitants. Hélas, la législation française 2011, décrite dans un Code du travail de 3391 pages croissant de 3 pages par jour, est devenue si instable et si inextricable qu'elle constitue un handicap sérieux à l'embauche, donc à l'activité économique.
- L'organisation, les programmes et le fonctionnement de l'Education nationale, dont les résultats médiocres classent chaque année la France parmi les pays les qui forment le plus mal leurs futures générations. 150.000 jeunes sortent chaque année de notre enseignement sans diplôme, formant des bataillons de chômeurs, alors que des centaines de milliers d'emplois ne trouvent pas de travailleurs qualifiés. Or le chômage et le manque de main d'œuvre coûtent cher à l'économie…

Il y a ainsi un grand nombre de paramètres de l'activité économique, et ils sont interdépendants. Il faut donc jouer sur plusieurs d'entre eux en même temps, voire sur la plupart, pour stimuler l'activité.

Que ce soit pour des raisons idéologiques ou pour d'autres raisons, *l'homme a une tendance naturelle à proposer comme solution d'un problème complexe la première idée qui lui vient à l'esprit*. Et si cette idée s'avère insuffisamment efficace, l'homme persévère souvent dans son erreur en *augmentant même quantitativement son action*.

> C'est ainsi que, malgré le désastre de la politique de relance à tout va sans concertation européenne de 1981-82, un autre politicien de gauche, M. Chevènement, a proposé la même politique en 2002 en tant que candidat à l'élection présidentielle, la même mais avec encore plus de vigueur ! Avec de l'incompétence, de l'idéologie ou de la démagogie, les mêmes problèmes conduisent aux mêmes erreurs.

Conclusion : parce qu'il a plus de paramètres, moins bien connus et liés par plus d'interactions, un problème complexe nécessite une approche rigoureuse, débarrassée le plus possible d'à priori et de contraintes émotionnelles. En voici une.

Une méthode de résolution de problèmes complexes

Le principe d'une bonne approche a été décrit par René Descartes en 1637 dans le "Discours de la méthode pour bien conduire sa raison". Il nous suffit de réfléchir à ses préceptes pour les présenter ici d'une manière adaptée à nos problèmes actuels.

1er précepte

> *"Le premier* [précepte] *était de ne recevoir jamais aucune chose pour vraie que je ne la connusse évidemment être telle ; c'est-à-dire, d'éviter soigneusement la précipitation et la prévention, et de ne comprendre rien de plus en mes jugements que ce qui se présenterait si clairement et si distinctement à mon esprit que je n'eusse aucune occasion de le mettre en doute."*

Ne considérer comme vrai que ce dont on est sûr, dit Descartes.

> (Il croit une certitude fiable si elle est prégnante, remplaçant ainsi une preuve factuelle ou démontrée absente par une absence de doute, et excluant la possibilité qu'un homme sérieux puisse se tromper de bonne foi. Cette doctrine de la validité des certitudes personnelles est appelée *innéisme ;* Locke en 1690, puis Kant en 1781, ont montré à quel point elle est illusoire.)

La notion moderne de vérité scientifique a été définie par Karl Popper, et les limites des raisonnements déductifs (axiomatiques [67]) par Gödel et quelques autres logiciens du XXe siècle [6]. En simplifiant beaucoup :

- La vérité d'une affirmation n'est pas « son accord avec les faits ». C'est le fait qu'aucun spécialiste ne puisse démontrer qu'elle est fausse ou incomplète, ni logiquement ni expérimentalement ; on ne démontre donc pas la vérité, on a un consensus de non-fausseté. Et l'affirmation reste vraie provisoirement, jusqu'à ce qu'on trouve une raison incontestable de la remplacer ou de la compléter.
- Un raisonnement déductif se fait toujours sur la base d'hypothèses admises, les axiomes. Il est impossible de vérifier la cohérence (non-contradiction) ou la vraisemblance (sémantique) d'un système d'axiomes (axiomatique) en tant que conséquence de ces axiomes.

  Dans toute axiomatique on peut faire des affirmations (propositions) dont la véracité ou la fausseté sont indémontrables (propositions indécidables). *Au sens du déterminisme, de telles propositions sans justification algorithmique n'ont pas de cause identifiable*, donc *pas d'origine logique*. Si on découvre dans l'esprit d'un homme une telle proposition (ce qui arrive, voir l'important complément [92] et aussi [141]) *on peut qualifier sa présence dans le psychisme de non déterministe* ; elle résulte souvent d'une intuition.

Descartes recommande aussi "d'éviter soigneusement la précipitation et la prévention", c'est-à-dire les raisonnements sous l'empire d'une forte émotion ou basés sur des à priori discutables ; ce conseil est toujours d'actualité.

2e précepte

> *"Le second, de diviser chacune des difficultés que j'examinerais en autant de parcelles qu'il se pourrait, et qu'il serait requis pour les mieux résoudre."*

Ce précepte a été interprété à tort comme recommandant de décomposer un problème au maximum, en parcelles (sous-problèmes) aussi petites que possible, au prétexte que plus un sous-problème est petit plus il est simple à résoudre. Ce n'est pas ce que Descartes veut dire. En écrivant : "et qu'il serait requis pour les mieux résoudre", il recommande de choisir la décomposition « qui marche le mieux », une décomposition qui peut éventuellement comprendre des sous-problèmes assez complexes pour être résolus de manière holistique, lorsqu'on sait les résoudre ainsi.

Une des approches holistiques est l'utilisation de modèles, par exemple statistiques, lorsque c'est possible, c'est-à-dire *lorsqu'un modèle mathématique de la situation présente et/ou passée est assez stable et précis pour qu'on puisse s'en servir pour généraliser à toute la population et prévoir l'avenir*. Ce n'est pas souvent le cas pour un problème de cours de bourse, par exemple, car on ne peut prévoir les comportements moutonniers ou émotifs des intervenants, les événements politiques susceptibles de changer des perspectives d'évolution de cours, etc.

Décomposer un problème implique de faire d'abord une liste de ses sous-problèmes, en précisant pour chacun sa manière d'intervenir dans le problème de niveau supérieur et sa manière d'interagir avec d'autres sous-problèmes. Le seul fait de constituer cette liste empêche de se précipiter et de recommander la première solution qui vient à l'esprit, solution d'un seul sous-problème donc solution inadéquate si le problème est complexe.

Dans la manière d'intervenir il faut, en pratique, indiquer les influences de deux paramètres importants de nos jours : la durée nécessaire ou délai alloué, et le budget disponible ou le coût prévisible.

On décrit d'interaction avec d'autres sous-problèmes en indiquant le sens des implications : "implique", "est conséquence de" ou les deux. On décrit aussi les contraintes d'ordre : pour commencer à résoudre le sous-problème S, il faut déjà avoir résolu les sous-problèmes S1, S2, etc. On construit donc un diagramme où chaque décision, tâche ou étape est représentée par un cercle et ses liens avec les précédentes et suivantes par des lignes indiquant les contraintes de fin, de délai, etc. Lorsque ce diagramme est de type P.E.R.T. [310] on peut connaître l'enchaînement d'étapes constituant un « chemin critique » au sens délai ou coût.

Cette approche permet de résoudre au moins qualitativement les problèmes ou parties de problèmes "à complexité organisée" au sens de Hayek, lorsqu'il est possible d'identifier les sous-problèmes et leurs interactions.

Qu'on ait pu ou non identifier et préciser suffisamment certains sous-problèmes ou interactions, on documente pour chaque sous-problème ou étape *les risques de non-résolution ou échec* : qu'est-ce qui peut empêcher une bonne prédiction de résultat ou une bonne résolution du problème, une résolution respectant délai et budget ? ; quels paramètres, quelles contraintes pourraient éventuellement intervenir pour un sous-problème donné ? peut-on évaluer la probabilité d'un échec, d'un surcoût ou d'un dépassement de délai ?

3e précepte

> *"Le troisième, de conduire par ordre mes pensées, en commençant par les objets les plus simples et les plus aisés à connaître, pour monter peu à peu comme par degrés jusques à la connaissance des plus composés, et supposant même de l'ordre entre ceux qui ne se précèdent point naturellement les uns les autres."*

Descartes recommande de résoudre les sous-problèmes un par un, parce que c'est plus facile et plus clair, en commençant par les problèmes les plus simples à résoudre. Chaque fois que tous les sous-problèmes d'un problème de niveau supérieur sont résolus, on travaille à résoudre ce dernier en tenant compte des interactions. On procède ainsi à des intégrations (synthèses) successives.

Il faut, chaque fois qu'on a résolu un sous-problème, vérifier la stabilité de sa solution par rapport aux contraintes et risques connus, pour ne pas considérer cette solution comme certaine et sans risque, notamment en ce qui concerne les délais et les coûts.

Cette méthode est très utilisée en génie logiciel, où on procède aux tests de chaque module logiciel avant de l'intégrer avec d'autres dans un module englobant, que l'on testera à son tour. Dans certaines applications, après les *tests logiques* (le problème fait-il ce qu'on en attend dans tous les cas du cahier des charges), on procède aux *tests de résistance aux cas aberrants* (le programme sait-il se défendre contre des données d'entrée absurdes ou des situations aberrantes en fournissant des réponses qui restent maîtrisées au lieu de s'effondrer ?) et enfin aux *tests de performance* (débit transactionnel) et *temps de réponse*. Enfin, on finalise la documentation du logiciel (cahier des charges, mode d'emploi, organisation en modules et modèles de données pour la maintenance, tests et résultats, délai et coût de réalisation).

Lorsqu'un problème est tel que certains paramètres, interactions et risques sont inconnus ou incertains, il vaut mieux commencer sa résolution en étudiant les chances d'aboutir : qu'est-ce qui permet d'espérer qu'on trouvera une solution satisfaisante ? Que peut-il se passer si on n'en trouve pas ?

On construit ensuite le diagramme d'enchaînement des tâches de la résolution du problème, pour déterminer les chemins critiques de difficulté, de risque, de coût, de délai ; contrairement à ce que Descartes recommande, on ne commence pas par les sous-problèmes les plus simples tant qu'on ne s'est pas assuré qu'on a une chance d'aboutir.

4e précepte

> *"Et le dernier, de faire partout des dénombrements si entiers et des revues si générales, que je fusse assuré de ne rien omettre."*

Descartes recommande de vérifier qu'on n'a rien oublié. Il faut aussi vérifier qu'on ne s'est pas trompé (tests logiques ci-dessus), que la solution résiste à des évolutions imprévues mais possibles du cahier des charges (tests de résistance ci-dessus), que les contraintes de coût et budget ont des chances d'être respectées.

Il est prudent, aussi, de progresser par étapes. Lorsque la solution d'un sous-problème, mise en œuvre isolément, est possible et bénéfique, on peut la mettre en

œuvre sans attendre la solution d'ensemble. On vérifiera ainsi qu'elle est valable, et on profitera de ses résultats avant que le tout problème initial soit résolu ; souvent même, l'expérience de son utilisation entraînera une évolution de l'énoncé du problème plus complexe dont elle fait partie, qu'il était donc urgent de ne pas résoudre dans l'état initial de son cahier des charges.

Mon expérience d'informaticien m'a appris que de nombreuses applications informatiques géantes, par exemple à l'échelle de toute l'armée de terre ou de toute l'administration des impôts, ont échoué si gravement qu'elles ont été abandonnées après investissement de millions d'euros. Elles ont été remplacées par des sous-applications plus simples, moins ambitieuses, moins intégrées, mais qu'on a su réaliser en respectant la qualité, (et parfois !) le délai et le budget.

Références

Chaque lien de ce texte conduit à un paragraphe de la version HTML du livre

Le déterminisme étendu pour mieux comprendre et prévoir
***Un pont entre science et philosophie pour la pensée rationnelle*"**
http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.pdf

Déterminisme : la définition précise et détaillée de ce terme, qui diffère un peu de celle que tout le monde connaît, figure dans le livre ci-dessus à partir du paragraphe "Le postulat de causalité".

Retour page d'accueil